ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 631.363.7:62.01.57 DOI 10.12737/18277

Параметры сечения потоков циркуляции смешиваемых кормов в наклонном одношнековом порционном смесителе*

В. Ф. Хлыстунов[1], С. В. Брагинец[2], М. В. Чернуцкий[2], А. Н. Токарева[3]**
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, г. Зерноград, Российская Федерация
[3]Донской аграрный университет, г. Зерноград, Российская Федерация.

Loop flow section conditions of the mixable feed in tilted single-screw batch mixer ***

V. F. Khlystunov[1], C. V. Braginets[1], M. V. Chernutskiy[1], A. N. Tokareva[2]**
[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation.
[2]North Caucasian Research Institute of Agricultural Engineering and Electrification of Agriculture, Zernograd, Russian Federation
[3]Don Agrarian University, Zernograd, Russian Federation

Представлена математическая модель процесса смешивания кормов в порционном циркуляционном наклонном одношнековом смесителе. Модель включает в себя систему уравнений изменения концентрации контрольного ингредиента в характерных зонах смесителя. Для решения системы уравнений рассмотрено состояние кормового материала в период начала загрузки смесителя и начала обрушения. Приведены схема и математические выражения сил, действующих на корм в процессе загрузки. В результате решения уравнений получена зависимость для определения высоты слоя корма от геометрических параметров бункера смесителя и физико-механических свойств кормового материала. Показана схема сил, действующих на кормовой материал в начале процесса обрушения. С учетом зависимости, полученной для первого состояния корма, определена величина высоты слоя обрушиваемого материала. Определено, что из первоначальной зоны условного вытеснения формируется две зоны. Одна — зона идеального вытеснения в направлении транспортирования корма снизу вверх и вторая — зона идеального вытеснения в направлении обрушения корма сверху вниз. Площади поперечного сечения данных зон могут быть определены на основе выведенных уравнений.

Ключевые слова: смеситель, шнек, кормовой материал, угол наклона, зона условного вытеснения, зона идеального смешивания, высота слоя, коэффициенты внутреннего и внешнего трения.

A mathematical model of the feed mixing in a tilted single-screw circulating batch mixer is presented. The model includes a system of equations of control component concentration change in the representative zones of the mixer. The feed material state at the mixer loading start-up and hulling onset is considered for solving a system of equations. A flow pattern and mathematical expressions of the forces affecting the feed during the charging process are given. As a consequence of the equations solution, the dependence for determining the height of the feed layer on the mixer hopper geometrics and the physical and mechanical- and physical properties of the feed material is obtained. A flow pattern of the forces affecting the feed material at the hulling onset is shown. The layer height value of the hulled material is determined with account of the dependence obtained for the first state of feed. It is determined that two zones are formed from the area of the original conditional displacement. The first one is a plug-flow zone of the bottom-up feed transportation, and the second one is a plug-flow zone in the direction of the downward feed hulling. The cross-sectional area of these zones can be determined on the basis of the derived equations.

Keywords: mixer, auger, feed material, tilt angle, conditional displacement area, area of ideal mixing, layer height, coefficients of internal and external friction.

Введение. Многолетними и многочисленными исследованиями, проведенными в СКНИИМЭСХ, была доказана целесообразность использования в технологических линиях приготовления кормов для различных видов животных порци-

* Работа выполнена по теме № 070–2014–0008 в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России в части НИР.
** E-mail: vniptim@gmail.com, sbraginets@mail.ru, m1chaelc@yandex.ru, tanna_ing@mail.ru
*** The research is done on theme no. 070–2014–0008 within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in R&D.

онных циркуляционных смесителей кормов со шнековыми рабочими органами [1–3]. В них нормируемый показатель качества процесса достигается на стадии конвективного смешивания, осуществляемого, в отличие от диффузионного смешивания, со значительно большей интенсивностью. Таким образом, эти смесители в несколько раз более производительны, чем смесители перераспределения или внедрения [4,5].

Одной из перспективных моделей циркуляционных смесителей является модель с наклонным бункером, внутри которого установлены один или два шнековых рабочих органа [6,7]. При этом наблюдается снижение энергоемкости процесса вследствие того, что принудительная подача смешиваемого материала на верхнем горизонтальном уровне заменяется гравитационным его осыпанием из верхней части бункера.

Обоснование математической модели. Как показали предварительные исследования одновального порционного циркуляционного наклонного смесителя (ОПЦНС), в нем возникают несколько ярко выраженных потоков циркуляции смешиваемых кормовых ингредиентов (рис.1) [7].

При описании процесса конвективного смешивания в таких смесителях для интерпретации в виде полного ориентированного графа циркуляции потоков используют математическую модель в виде системы уравнений изменения концентрации контрольного ингредиента (индикатора) в характерных зонах [1]. Процедуру смешивания в рассматриваемом смесителе можно представить следующим образом. В период загрузки кормовых ингредиентов (рис.1а) наблюдается заполнение межшнекового пространства шнека и движение слоя материала над ним (в межшнековом просвете) [1]. Тем самым формируется зона условного транспортирования 31. В момент осыпания корма на стыке основной и отбойной навивки шнека (граница зоны 23), он, за счет взаимодействия материала подаваемого основной навивкой и отбойным витком, расположенным в верхней части бункера, выталкивается вверх, формируя зону идеального смешивания 23. Затем начинается обрушение кормового материала, сформированного частью его из зон 31 и 23 (рис.1б).

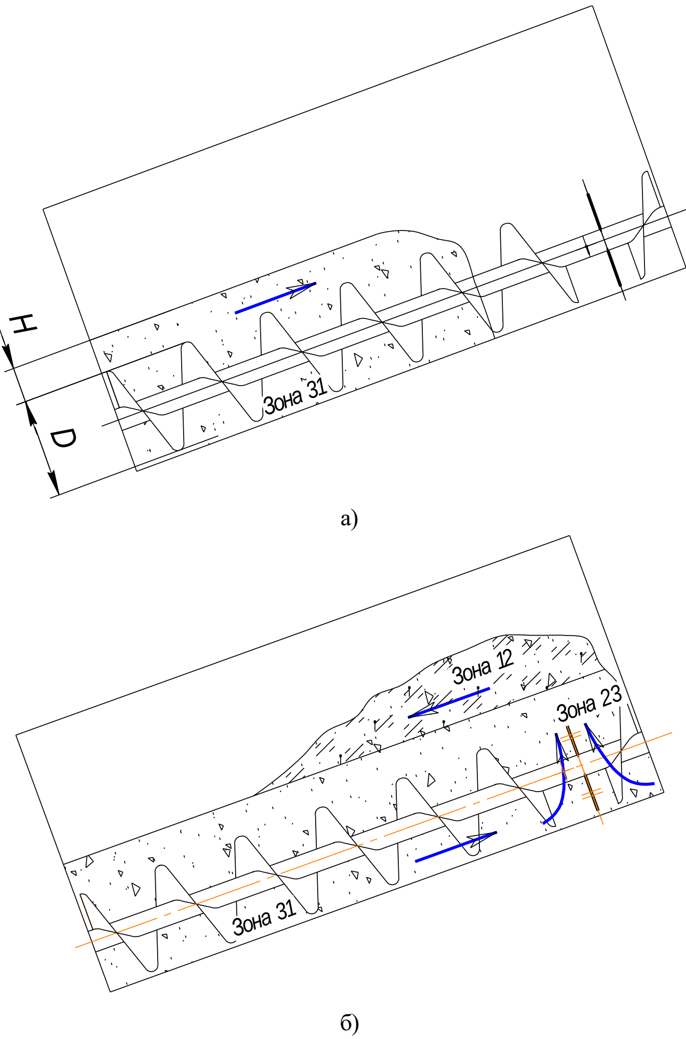


Рис.1. Состояние кормового материала в период начала загрузки смесителя (а) и начала обрушения (б)

При графовой интепретации порционных циркуляционных смесителей (по В. Ф. Хлыстунову) каждую характерную их зону представляют ребром полного ориентированного графа, которое принято обозначать индексом, состоящим из двух цифр. Первая из них — это вершина графа, откуда материал начинает двигаться, а вторая — зона, куда материал поступает. На этом рисунке 12 и 23 являются зонами идеального смешивания, а зона 31— идеального вытеснения.

На рис. 1а и 1б показана одна и та же зона. В период загрузки бункера формируется только одна зона — 31 (рис.1а). В стационарном режиме сформированы все зоны, характеризующие процесс в рассматриваемом смесителе (рис.1б).

Математическое описание процессов, протекающих в порционном циркуляционном смесителе можно представить для зоны идеального смешивания следующими образом:

$$T_{ij}\cdot\frac{dC_{ij}(t)}{dt}+C_{ij}(t)=\frac{\sum\limits_{k=1}^{d-(i)}C_{ki}(t)\cdot Q_{ki}}{\sum\limits_{k=1}^{d-(i)}Q_{ki}}\,, \qquad (1)$$

где $C_{ij}(t)$, $C_{ki}(t)$ — соответственно текущее значение концентрации индикатора на ребре ij и на стоке j к вершине i;Q_{ki} — объемная производительность k-ого стыка к вершине i; $d(i)$ — полустепень захода вершины i; T_{ij} — постоянная времени зоны ij.

Аналогично для зоны идеального вытеснения:

$$C_{pm}(t)=\frac{\sum\limits_{n=1}^{d-(i)}(t-T_{pm})Q_{ni}}{\sum\limits_{n=1}^{d-(i)}Q_{ni}}\,. \qquad (2)$$

В этих формулах объемную производительность потоков определяют как

$$Q_{ki}=V_{ki}\cdot S_{ki}\,, \qquad (3)$$

где V_{ki} — линейная скорость k-ого потока в направлении i-ого стока, м/с; S_{ki} — площадь поперечного сечения k-го потока корма в направлении i-го стока, м^2.

Математическая модель процесса смешивания в порционном смесителе. В рассматриваемом случае необходимо определить параметры сечений зон 12 и 31. Последняя складывается из диаметра шнека и слоя материала над ним. В момент загрузки это H.

Из рассмотрения первого состояние материала (рис. 2а) можно записать следующее неравенство:

$$F_a > F_1+F_2+F_{oc}\,, \qquad (4)$$

где F_a — сила трения от действия материала над шнеком на нижележащий материал, H; F_1, F_2 — соответственно сила трения о правую и левую стенки бункера, H; F_{oc} — сила осыпания движущегося материала над шнеком, H.

Пользуясь методическим подходом [1], получили

$$F_a=g\cdot\gamma\cdot D\cdot H\cdot L\left(1+k\right)\cdot f_м\cdot\cos\theta \qquad (5)$$

Поскольку угол наклона стенок бункера в данном случае одинаков, то

$$F_1=F_2=0{,}5g\cdot\gamma\cdot H^2\cdot L\left[1+\frac{tg\alpha}{\cos\left(f_к+tg\alpha\right)}\right]\cdot f_к\cdot\cos\theta \qquad (6)$$

$$F_{oc}=g\cdot\gamma\cdot D\cdot H\cdot L\left(1+k\right)f_м\cdot\sin\theta\,. \qquad (7)$$

Здесь D — диаметр шнека, м; $f_м$, $f_к$— соответственно коэффициенты внутреннего и внешнего трения кормосмеси (о стенки бункера); α — угол наклона боковой стенки бункера к вертикали, град; θ — угол наклона бункера смесителя к горизонту, град; k — безразмерный эмпирический коэффициент доли зазоров между шнеком и кожухом от диаметра шнека, м; H — высота слоя материала над шнеком в момент начала его транспортирования, м; γ — средняя насыпная плотность кормового материала, кг/м^3; g — ускорение свободного падения.

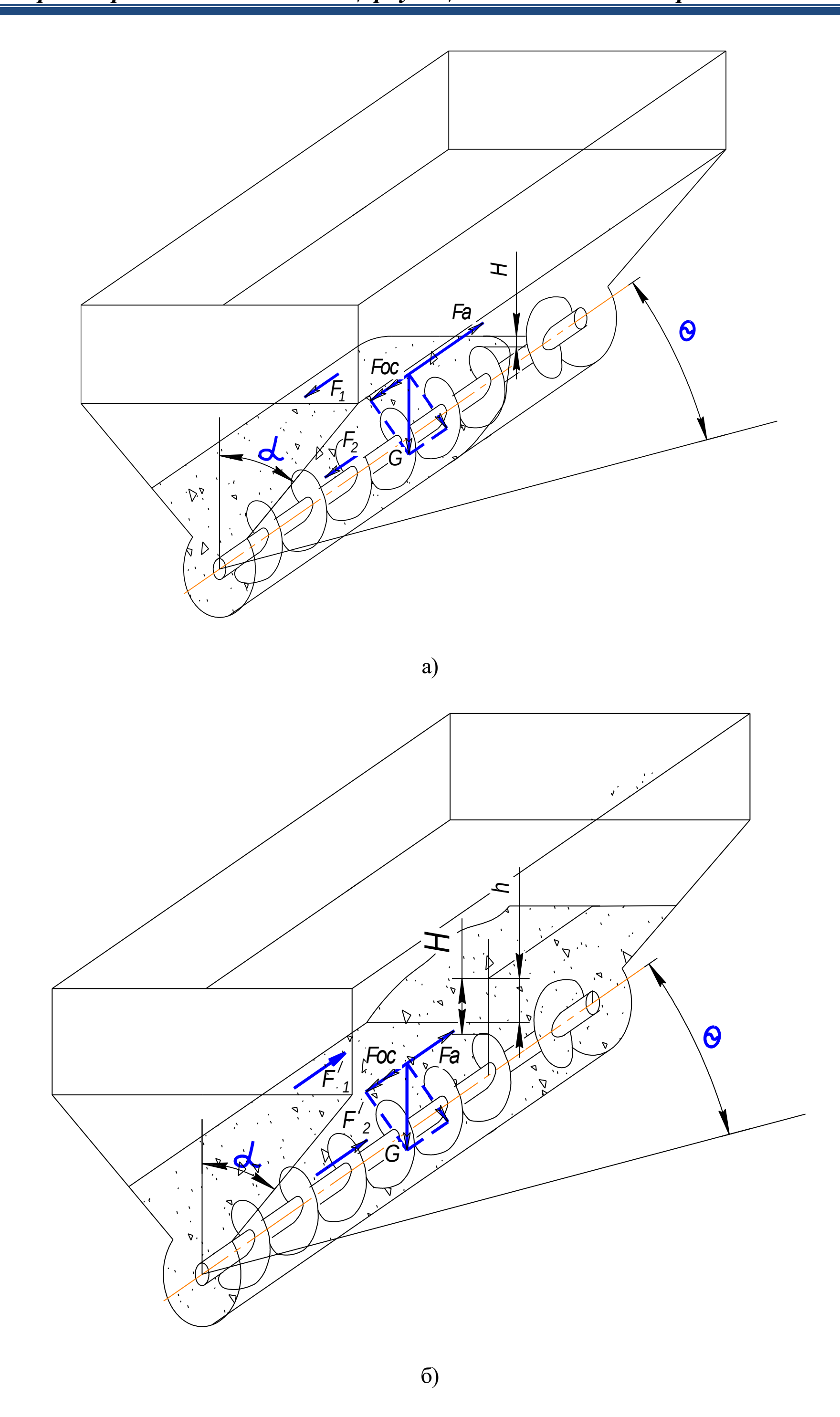


Рис. 2. Схема сил, действующих на материал в зоне межшнекового просвета (а) и в зоне осыпания (б)

Решая совместно уравнения (4–7), получаем

$$H < \frac{D(1+k)(\cos\theta - \sin\theta)\cdot f_м}{\left[1+\dfrac{tg\alpha}{cos\alpha\left(f_к + tg\alpha\right)}\right]\cos\theta\cdot f_к} \tag{8}$$

Из рассмотрения второго состояния (рис. 2б), можно записать следующее неравенство:

$$F_{oc} + F_1 + F_2 > F_1^/ + F_2^/ + F_a \tag{9}$$

Формулы для сил, входящих в (9), будут аналогичны (5–7). Однако вместо *H* следует записать *h*, т.е. величину высоты слоя обрушиваемого материала (высоту зоны идеального смешивания 12). Тогда неравенство (9) примет следующий вид

$$g\cdot\gamma\cdot D\cdot H\cdot L(1+k)\,f_м\cdot\sin\theta+g\cdot\gamma\cdot H^2\cdot L\left[1+\frac{tg\alpha}{\cos\alpha\left(f_к+tg\alpha\right)}\right]\cdot f_к\cdot\cos\theta>$$
$$>g\cdot\gamma\cdot D\cdot h\cdot L(1+k)\,f_м\cdot cos\theta+g\cdot\gamma\cdot h^2\cdot L\left[1+\frac{tg\alpha}{\cos\alpha\left(f_к+tg\alpha\right)}\right]\cdot f_к\cdot\cos\theta \quad (10)$$

Подставив в (10) высоту слоя H из выражения (8), после соответствующих преобразований получили выражение вида:

$$Ah^2+Bh-C<0\,, \quad (11)$$

где

$$A=\left[1+\frac{tg\alpha}{cos\alpha\left(f_к+tg\alpha\right)}\,f_к\cdot\cos\theta\right], \quad (12)$$

$$B=D(1+k)\,f_м\cdot\cos\theta\,, \quad (13)$$

$$C=\frac{D^2(1+k)^2(\cos\theta-\sin\theta)\,f_м^2\cdot\cos\theta}{A}\,. \quad (14)$$

Решение квадратичного уравнения провели применительно к кормосмеси для свиней, физико-механические свойства которой были выявлены в результате ранее проведенных исследований [8,9] и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Обозначение	Значение
Угол наклона бункера к горизонту θ, град	20
Угол наклона стенки бункера α, град	35
Коэффициент трения кормосмеси о поверхность бункера, $f_к$	0,34
Коэффициент внутреннего трения кормосмеси, $f_м$	0,6
Безразмерный эмпирический коэффициент доли зазоров между шнеком и кожухом, k	0,1

Заключение. По результатам расчетов получили следующие зависимости:

– высота слоя материала выбранной кормосмеси над шнеком в момент его выталкивания в соответствии с выражением (8) должна находиться в пределах

$$H<0,678D\,, \quad (15)$$

– высота слоя обрушиваемого материала должна соответствовать неравенству

$$h<0,47D\,. \quad (16)$$

Полученные зависимости позволяют объяснить сущность процесса смешивания в смесителе рассматриваемого типа. При этом из первоначальной зоны 31 условного вытеснения формируется две зоны. Первая — зона идеального смешивания в направлении транспортирования корма снизу вверх с высотой сечения *H–h*, вторая — зона идеального вытеснения в направлении обрушения корма сверху вниз с высотой сечения *h*.

Библиографический список

1. Хлыстунов, В. Ф. Совершенствование технического оснащения системы жизнеобеспечения свиней / В. Ф. Хлыстунов. — Зерноград : ВНИПТИМЭСХ, 2009. — 232с.

2. Кормановский, Л. П. Механико-технологические основы точных технологий приготовления и раздачи кормов КРС многофункциональными агрегатами / Л. П. Кормановский, М. А. Тищенко. — Москва : РАСХН, 2000 — 344с.

3. Максименко, В. А. Исследование процесса смешивания и выдачи кормов раздатчиком-смесителем на откормочных площадках крупного рогатого скота вместимостью до 30 тыс. скотомест : Дис. … канд.техн. наук. / В. А. Максименко. — Зерноград, 1982. — 175 с.

4. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. — Москва : Машиностроение, 1973. — 215 с.

5. Paul EdwardL. Handbook of industrial mixing : science and practice/ EdwardL. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. – Hoboken, New Jersey: JohnWiley& Sons, Inc., 2004. – 1432 p.

6. Хлыстунов, В. Ф. Моделирование процесса смешивания кормов в шнековом смесителе с наклонным бункером / В. Ф.Хлыстунов, И. И. Тищенко, А. Н. Токарева, Б. А. Карташов // Вестник РАСХН. — 2007. — №4. — с.13–15.

7. Хлыстунов, В. Ф. Модель процесса смешивания кормов в порционном наклонном одношнековом смесителе / В. Ф. Хлыстунов, С. В. Брагинец, М. В. Чернуцкий, А. Н. Токарева, Т. М. Чередниченко // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий : сб. науч. докл. междунар. науч.-техн. конф. / ФГБНУ ВИМ — Москва, 2014 — с.41–45.

8. Пахомов, В. И. Технологии и технические средства для производства полнорационных кормосмесей в условиях автономных сельхозпредприятий / В. И. Пахомов, А. В. Смоленский, П. А. Чапский. — Зерноград : ГНУ СКНИИМЭСХ, 2010. — 112с.

9. Правила организации и ведения технологических процессов производства продукции комбикормовой промышленности. — Воронеж : ВНИИКП, 1997. — 256 с.

References

1. Khlystunov, V.F. Sovershenstvovanie tekhnicheskogo osnashcheniya sistemy zhizneobespecheniya sviney. [Improving the equipment of the life support system for pigs.] Zernograd: VNIPTIMESKh, 2009, 232 p. (in Russian).

2. Kormanovskiy, L.P., Tishchenko, M.A. Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy tochnykh tekhnologiy prigotovleniya i razdachi kormov KRS mnogofunktsional'nymi agregatami. [Mechanical and technological backgrounds for precision technologies of preparation and distribution of cattle feed by multifunctional units.] Moscow: RASKhN, 2000, 344 p. (in Russian).

3. Maksimenko, V.A. Issledovanie protsessa smeshivaniya i vydachi kormov razdatchikom-smesitelem na otkormochnykh ploshchadkakh krupnogo rogatogo skota vmestimost'yu do 30 tys. skotomest : Dis. … kand.tekhn. nauk. [Study on mixing and dispensing feed by the dispenser-mixer on the feedlot for up to 30 thousand cattle stalls: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Zernograd, 1982, 175 p. (in Russian).

4. Makarov, Y.I. Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov. [Bulkblending devices.] Moscow: Mashinostroenie, 1973, 215 p. (in Russian).

5. Paul, Edward L., Atiemo-Obeng, Victor A., Kresta, Suzanne M. Handbook of industrial mixing: science and practice. Hoboken, New Jersey: JohnWiley& Sons, Inc., 2004, 1432 p.

6. Khlystunov, V.F., Tishchenko, I.I., Tokareva, A.N., Kartashov, B.A. Modelirovanie protsessa smeshivaniya kormov v shnekovom smesitele s naklonnym bunkerom. [Simulation of feed mixing in the screw mixer with a sloping hopper.] Vestnik RASKhN, 2007, no. 4, pp. 13–15 (in Russian).

7. Khlystunov, V.F., Braginets, S.V., Chernutskiy, M.V., Tokareva, A.N., Cherednichenko, T.M. Model' protsessa smeshivaniya kormov v portsionnom naklonnom odnoshchnekovom smesitele. [Model of feed mixing process in a sloping single-screw batch mixer.] Innovatsionnoe razvitie APK Rossii na baze intellektual'nykh mashinnykh tekhnologiy: sb. nauch. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [The innovative development of Russian agro-industrial complex on the basis of intelligent machine technologies: Proc. Int. Sci. Eng. Conf.] FGBNU VIM, Moscow, 2014, pp. 41–45 (in Russian).

8. Pakhomov, V.I., Smolenskiy, A.V., Chapskiy, P.A. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya proizvodstva polnoratsionnykh kormosmesey v usloviyakh avtonomnykh sel'khozpredpriyatiy. [Technologies and facilities for the of TMR manufacture at the autonomous farms.] Zernograd: GNU SKNIIMESKh, 2010, 112 p. (in Russian).

9. Pravila organizatsii i vedeniya tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva produktsii kombikormovoy promyshlennosti. [Management of product manufacturing process flow of the feed mill industry.] Voronezh: VNIIKP, 1997, 256 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 20.10.2015
Сдана в редакцию 23.10.2015
Запланирована в номер 22.02.2016